

Fondamenti dell'ottica

© 2003 The Imaging Source Europe GmbH

Tutti i diritti sono riservati

<http://www.1394imaging.com/>

Versione: dicembre 2003

L'ottica - non è un problema - si tratta di semplici nozioni scolastiche. Ma - siamo sinceri - Lei è in grado di calcolare la distanza focale per una qualsiasi applicazione della misura ottica? Se sì, Lei è un'eccezione e non Le serve certo proseguire la lettura. A tutti gli altri qui di seguito, offriamo una seconda possibilità.

Cominciamo dal principio

"Frammento di vetro causa incendio boschivo" - una tipica notizia estiva. Come è potuto accadere? A causa della distanza enorme, il sole si presenta come un piccolo punto che emette raggi di luce in modo parallelo (Fig. 1a). Se questi raggi paralleli attraversano una lente (o un pezzo di vetro simile ad una lente) questi convergono dietro la lente nel fuoco (nel contesto di un incendio boschivo il termine "fuoco" è adatto nel vero senso della parola).

Ma cosa succede se il punto di luce si trova vicino alla lente, e quindi i raggi di luce non attraversano questa lente parallelamente? In questa situazione i raggi convergono dietro al fuoco (Fig. 1b). Se osservassimo la rappresentazione del punto di luce all'altezza del fuoco, vedremmo una macchia smorta e sfocata.

Ed ecco che si presenta il problema della "messa a fuoco". Per far sì che la rappresentazione del punto di luce sia a fuoco, si deve aumentare la distanza tra il piano della rappresentazione e la lente (la cosiddetta distanza dell'immagine), finché il piano della rappresentazione ed il punto di convergenza dei raggi siano sovrapposti (Fig. 1c).

Dunque, per un singolo punto di luce, tutto ciò è abbastanza semplice. Ma come funziona la rappresentazione di un oggetto come per esempio una vite, una scheda o una piastra di acciaio?

Dal punto di luce all'immagine

Un punto di luce non è necessariamente originato direttamente dal sole, da una candela o da una lampada, cioè da una fonte diretta, ma può essere anche creato da una riflessione. Così possiamo immaginare la superficie di un oggetto riflettente come un insieme di infiniti punti di luce. Consideriamo quindi il punto di partenza ed il punto finale della freccia mostrata nella Fig. 1d e seguiamo i raggi di questi due punti. Dietro la lente, i raggi creano il punto di partenza ed il punto finale della rappresentazione della freccia (però capovolta). Tutti gli altri infiniti punti di luce della freccia si comporteranno allo stesso modo, creando così un'immagine completa della freccia sul piano della rappresentazione.

Dalla lente all'obiettivo

Nel contesto della tecnica di misurazione il nostro scopo è quello di rappresentare un oggetto su un sensore d'immagine (come per esempio il chip di CCD). L'immagine che si crea come precedentemente descritto (Fig. 1d) è la base per diverse misurazioni, come per esempio la dimensione, la posizione o la natura della superficie.

Tuttavia non si usano delle singole lenti per questo, ma si combinano le lenti per creare gli obiettivi. La qualità della rappresentazione di un obiettivo è migliore di quella di una singola lente. Per il lavoro di tutti i giorni possiamo fortunatamente considerare un obiettivo come una lente ideale.

Ma quale è adesso l'obiettivo giusto? La caratteristica fondamentale di un obiettivo è il rapporto tra la dimensione dell'immagine e quella dell'oggetto:

$$\text{Rapporto di riproduzione} = \frac{\text{Dimensione dell'immagine}}{\text{Dimensione dell'oggetto}}$$

Vediamo un esempio: con un rapporto di riproduzione di 0,1, una vite con una lunghezza di 5 cm è rappresentata da un'immagine di 5 mm. Se abbiamo invece un oggetto piccolissimo di 0,5 mm che deve essere ingrandito a 5 mm, il rapporto di riproduzione sarà 10.

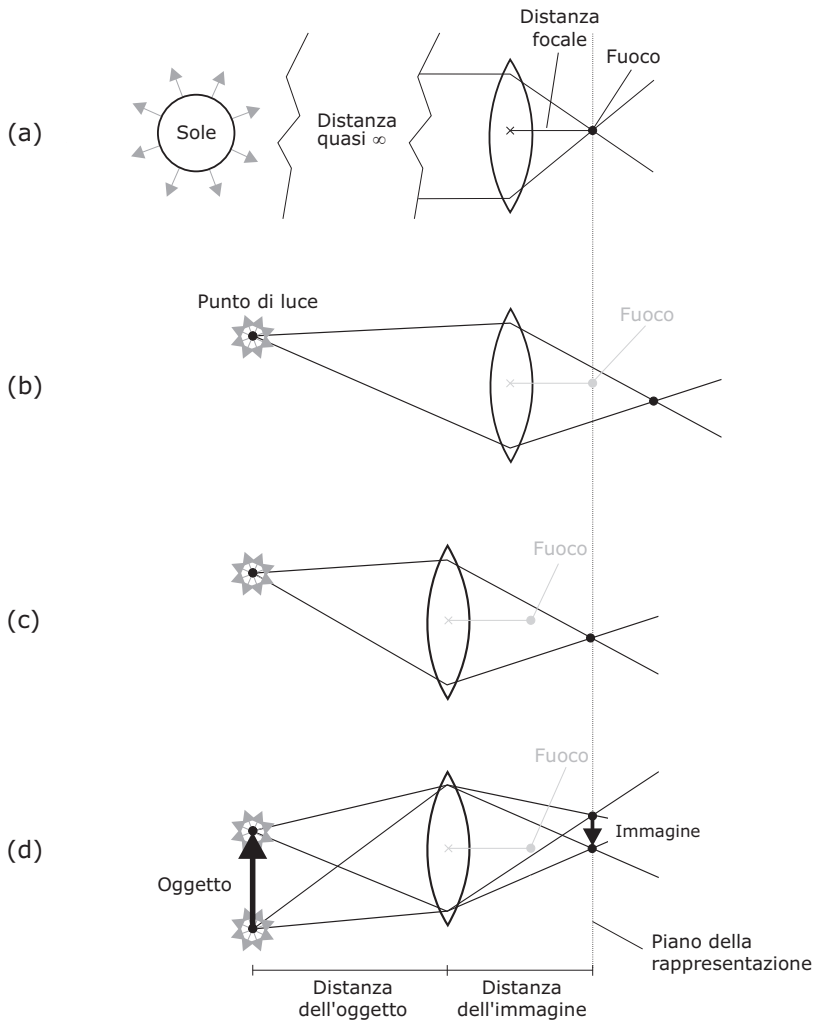


Fig. 1: Dal punto di luce all'immagine

Come mostra la Fig. 1d. il rapporto di riproduzione dipende inoltre dalla distanza dell'oggetto (alias distanza di lavoro). Più l'oggetto è distante, più piccola è la sua immagine. Questo vuol dire che la determinazione del rapporto di riproduzione ha senso soltanto se conosciamo anche la distanza dell'oggetto.

Troppo complicato? Probabilmente sì - perciò abbiamo bisogno di un parametro che descriva gli obiettivi più direttamente. La soluzione ci viene dalla vita di tutti i giorni: la

$$Distanza\ focale = \frac{Distanza\ dell'oggetto * Dimensione\ dell'immagine}{Dimensione\ dell'oggetto + Dimensione\ dell'immagine}$$

Le vacanze e la misura ottica hanno qualcosa in comune?

Veramente molto poco. Ma scattare una foto in vacanza e la misurazione di una bramma d'acciaio si basano sulle stesse leggi ottiche. Supponiamo che il sensore d'immagine abbia le dimensioni di una pellicola di piccolo formato con un'altezza di 24 mm e una larghezza di 36 mm. A questo punto vorremmo rappresentare la nostra spiaggia con una larghezza di 1000 m, a 500 m di distanza. Perciò la distanza focale è:

$$Distanza\ focale = \frac{500.000mm * 36mm}{1.000.000mm + 36mm} = 18mm$$

Se cambiamo la pellicola di piccolo formato con un tipico chip di CCD con le dimensioni di 4,8 * 6,4 mm, la distanza focale è nettamente più piccola:

$$Distanza\ focale = \frac{500.000mm * 6,4mm}{1.000.000mm + 6,4mm} = 3,2mm$$

Non c'è spiaggia senza tipi alla "Bay Watch". Se l'immagine del tipo deve essere rappresentata su una pellicola di piccolo formato a 500 m di distanza, e se supponiamo che lo stesso tipo è alto 2 m, allora abbiamo:

$$Distanza\ focale = \frac{500.000mm * 24mm}{2.000mm + 24mm} = 5.929mm$$

Una distanza focale del genere normalmente non fa parte di una attrezzatura fotografica normale. Bene o male dovremo avvicinarci al tipo. Con una distanza di 10 m possiamo usare una distanza focale di 120 mm (e quindi un obiettivo più o meno normale), per rappresentare la sua immagine su una pellicola di piccolo formato.

Per gli amici degli esseri viventi più piccoli invece, spesso è una distanza troppo grande che procura grattacapi e non una troppo piccola. Se ci posizioniamo a 30 cm di distanza da un insetto, con un'altezza di 10 mm, riusciamo a rappresentare lo stesso insetto su una pellicola di piccolo formato con una distanza focale di:

$$Distanza\ focale = \frac{300mm * 24mm}{10mm + 24mm} = 212mm$$

Ma ha mai provato a mettere a fuoco un obiettivo "normale" di 200 mm ad una distanza di 30 cm? Non ha alcuna possibilità.

I misteri degli anelli distanziali

Ad alcuni elementi tecnici viene data troppa fiducia, certe volte si pensa che possano fare miracoli. A questa categoria appartengono in modo particolare gli anelli distanziali. Vengono messi tra l'obiettivo e la telecamera per aumentare la distanza dell'immagine (Fig. 1d). A che serve? Più vicino è un punto di luce alla lente più indietro convergono i raggi di luce, e maggiore è la distanza dell'immagine per la messa a fuoco (Fig. 1b e 1d). Concretamente gli obiettivi realizzano la variazione della distanza dell'immagine tramite una trasmissione a vite senza fine. Questo meccanismo serve a spostare la lente nel corpo dell'obiettivo effettuando così il processo di messa a fuoco. Naturalmente lo stesso spostamento ha dei limiti meccanici. Uno di questi limiti determina la distanza massima dell'immagine e quindi anche la distanza minima dell'oggetto. Se volessimo avvicinarci di più all'oggetto del nostro desiderio, dovremmo aumentare semplicemente la distanza dell'immagine tramite un anello distanziale.

Questo effetto semplicissimo è circondato stranamente da diversi misteri, come per esempio un presunto aumento o diminuzione della profondità di campo. Sono tutte sciocchezze! Cerchiamo di occupare meglio il nostro tempo, con qualche questione di dettaglio sicuramente più rilevante per la pratica, come per esempio:

A cosa servono gli obiettivi attacco C?

Nella notte dei tempi i film venivano girati con le telecamere a tubi televisivi. I diametri esterni di questi tubi erano 1/2", 2/3" e 1", e i rettangoli fotosensibili sulla fronte dei tubi erano adeguatamente più piccoli. La Fig. 2 mostra le dimensioni di questi rettangoli, che sono anche la base per i moderni sensori d'immagine CCD.

L'attacco dell'obiettivo delle telecamere a tubi televisivi si chiamava "attacco C" (C sta per cinema). Si tratta di una filettatura a passo grosso di 1" e offre quindi una semplice, compatta e robusta base per gli obiettivi intercambiabili. La variante "attacco CS" si distingue soltanto per la misura di appoggio (Fig. 3).

Le diverse dimensioni dei tubi televisivi e dei CCD si riflettono sui diversi formati degli obiettivi: sfortunatamente, perché questo porta a credere che per esempio un CCD 1/3" abbia bisogno di un obiettivo 1/3".

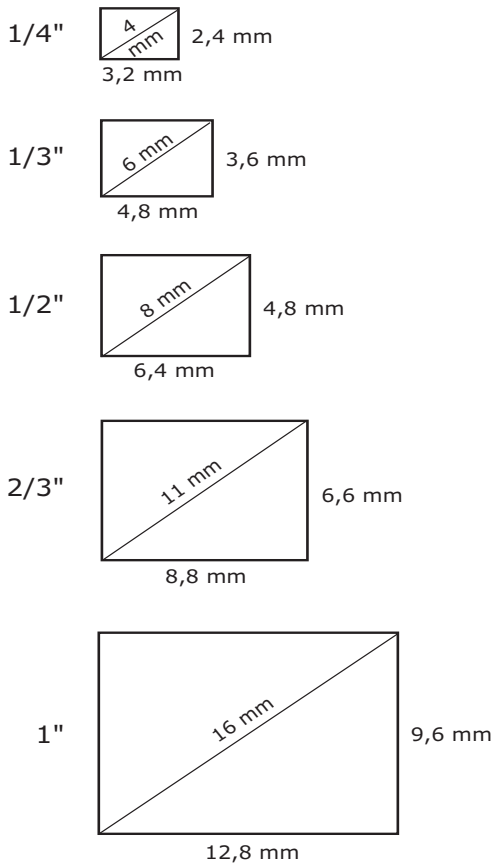


Fig. 2: I formati CCD

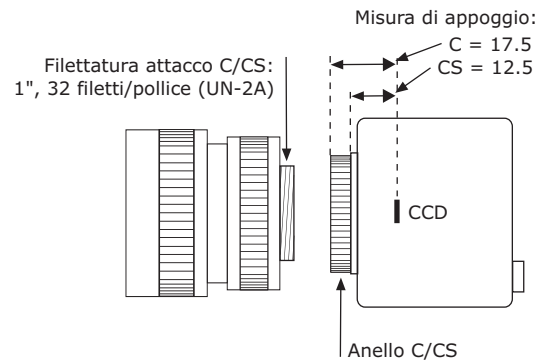


Fig. 3: L'attacco C.

Tutto ruota intorno al cerchio dell'immagine

Le pareti bianche sono forse un po' noiose, ma servono talvolta per dei piccoli giochi di pensiero. Immagini di puntare un obiettivo verso una tale parete. Come sarà l'immagine? Una chiara macchia rotonda (il cosiddetto cerchio d'immagine), che è così noiosa come la parete bianca. Prendiamo come esempio un obiettivo 1/3". Il cerchio d'immagine di quest'obiettivo è un po' più grande della diagonale di un CCD 1/3". Quindi la nostra macchia chiara copre il CCD completamente. Gli angoli di un CCD 1/2" invece rimarrebbero al buio. Questo significa che il formato di un obiettivo deve essere **più grande o uguale** al formato del CCD.

Sfortunatamente anche gli obiettivi non sono perfetti. Gli errori si vedono principalmente sui bordi. Per questo è consigliabile scegliere il formato dell'obiettivo il più grande possibile. Un'altra possibilità altrettanto semplice, per che i cosiddetti errori non esistano nemmeno sui bordi, è d'evitare che i raggi di luce attraversino la parte esterna della lente. Si raggiunge questo scopo tramite un diaframma.

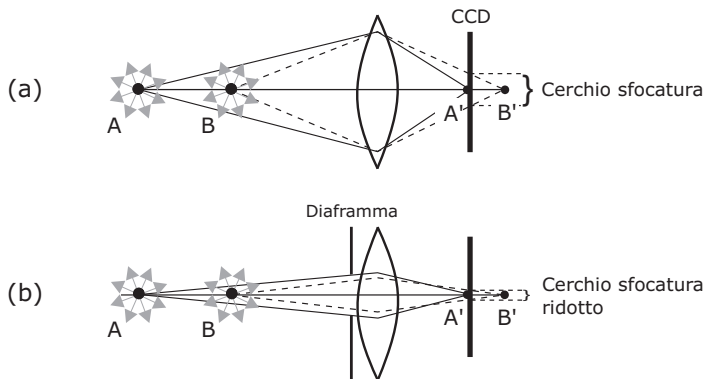


Fig. 4: Che cos'è la "nitidezza"?

Uno sguardo alla profondità di campo

I diaframmi non soltanto fanno sì che gli errori degli obiettivi si riducano, ma influenzano anche la nitidezza dell'immagine. Ma che cos'è la "nitidezza"? La Fig. 4a mostra due punti di luce A e B e le rispettive immagini A' e B'. La distanza dell'immagine (Fig. 1d) è regolata in modo tale che l'immagine A' finisca esattamente sul CCD. Questa è la "nitidezza"!

Il punto B si trova più vicino alla lente e quindi l'immagine B' si trova dietro al punto A'. Questo vuol dire che l'immagine B' sarà sul CCD una macchia sbiadita. Chiamerò questa macchia "cerchio sfocatura".

Concludendo, ciò significa che non è possibile rappresentare un oggetto tridimensionale in modo nitido. Soltanto un piano dello stesso oggetto sarà a fuoco, mentre tutti i piani davanti e dietro saranno sfocati. Ma come mai non è così nella pratica? Perché i nostri occhi non percepiscono un piccolo cerchio sfocatura come sfocato. Questo è l'effetto della profondità di campo. Nel caso di una pellicola di piccolo formato, "piccolo cerchio" significa che lo stesso cerchio non dovrebbe essere più grande di 1/30 mm. Nel caso di un CCD possiamo definire il cerchio sfocatura con le dimensioni di un pixel. Grosso modo i pixel di un CCD moderno misurano 5 * 5 µm.

Nella pratica è raro che si abbia bisogno di calcolare esattamente la profondità di campo. Comunque, anche il tema della "profondità di campo" (come il tema "anelli distanziali") è spesso un tema di fede, anziché essere un tema della conoscenza. Quindi conviene osservare la "formula della profondità di campo" attentamente per saperne di più:

$$\text{Profondità di campo} = \frac{\text{Distanza dell'oggetto}}{1 \pm \text{Cerchio sfocatura} * \text{Diaframma} * \frac{\text{Distanza dell'oggetto} - \text{Distanza focale}}{\text{Distanza focale}^2}}$$

Supponiamo di voler osservare dei dadi durante il processo produttivo con la telecamera MegaPixel DFK 31F03. I dadi hanno un diametro di 10 mm, mentre la distanza dell'oggetto è di 100 mm. Siccome la DFK 31F03 è fornita con un CCD di 1/3" (Fig. 3) , avremo bisogno di una distanza focale di

$$\text{Distanza focale} = \frac{100\text{mm} * 3,6\text{mm}}{10\text{mm} + 3,6\text{mm}} = 26,5\text{mm}$$

per rappresentare un dado completamente. Quindi possiamo usare senza problema, un obiettivo di 25 mm normalmente in commercio. Se supponiamo poi di avere un cerchio sfocatura di 5 µm, avremo un'immagine a fuoco solo nella seguente area, compresa tra il limite anteriore e il limite posteriore della profondità di campo:

$$\text{Limite anteriore della profondità di campo} = \frac{100\text{mm}}{1 + 0,005\text{mm} * 1,4 * \frac{100\text{mm} - 25\text{mm}}{25\text{mm}^2}} = 99,92\text{mm}$$

$$\text{Limite posteriore della profondità di campo} = \frac{100\text{mm}}{1 - 0,005\text{mm} * 1,4 * \frac{100\text{mm} - 25\text{mm}}{25\text{mm}^2}} = 100,08\text{mm}$$

Se volessimo una maggiore ampiezza della profondità di campo, non abbiamo altra alternativa che la chiusura del diaframma. Proviamo allora con un diaframma di 4:

$$\text{Limite anteriore della profondità di campo} = \frac{100\text{mm}}{1 + 0,005\text{mm} * 4 * \frac{100\text{mm} - 25\text{mm}}{25\text{mm}^2}} = 99,76\text{mm}$$

$$\text{Limite posteriore della profondità di campo} = \frac{100\text{mm}}{1 - 0,005\text{mm} * 4 * \frac{100\text{mm} - 25\text{mm}}{25\text{mm}^2}} = 100,24\text{mm}$$

Nonostante il numero di diaframma sia stato aumentato di circa 3 volte, il risultato non è certo sconvolgente. Tutto ciò è dovuto alla forte influenza della distanza focale. Se potessimo usare un obiettivo di 12 mm (e quindi dimezzare la distanza focale) la faccenda andrebbe meglio:

$$\text{Limite anteriore della profondità di campo} = \frac{100\text{mm}}{1 + 0,005\text{mm} * 4 * \frac{100\text{mm} - 12\text{mm}}{12\text{mm}^2}} = 98,79\text{mm}$$

$$\text{Limite posteriore della profondità di campo} = \frac{100\text{mm}}{1 - 0,005\text{mm} * 4 * \frac{100\text{mm} - 12\text{mm}}{12\text{mm}^2}} = 101,23\text{mm}$$

Tuttavia la rappresentazione del dado occupa il chip di CCD soltanto a metà. Se questo non fosse accettabile rimane solo la possibilità di una riduzione del diaframma. Per compensare però, dobbiamo aumentare la luce e/o prolungare il tempo di esposizione.

In sintesi la profondità di campo dipende da 3 parametri:

Cerchio sfocatura: Più piccolo è il cerchio sfocatura, più piccola è la profondità di campo.

Diaframma: Più piccolo è il numero del diaframma (quindi più "aperto" è il diaframma), più piccola è la profondità di campo.

Distanza focale: Più grande (!) è la distanza focale, più piccola è la profondità di campo. Questa relazione è di secondo grado. Quindi anche uno piccolo aumento della distanza focale porta ad una riduzione considerevole della profondità di campo.

Come già detto ci sono diversi dogmi per quanto riguarda l'argomento profondità di campo. Il preferito è quello per cui speciali forme di obiettivi (come per esempio l'obiettivo telecentrico), avrebbero una "profondità di campo" migliore. Nulla di ciò è vero, la profondità di campo dipende in ogni caso solo dai 3 parametri "cerchio sfocatura", "diaframma" e "distanza focale".

Ci sarebbe ancora molto da raccontare

Per esempio sull'angolo visuale, sugli obiettivi macro, sugli obiettivi telecentrici, e soprattutto sul fatto sorprendente che la misurazione delle distanze è più precisa se l'immagine è un po' sfocata. Amplieremo man mano questo testo informandola via email.